

J. Rückert und F. Neubauer\*

## **Zum Kontaktverhalten von feuerverzinktem und unverzinktem Bewehrungsstahl in Beton bei erhöhter Temperatur**

„Werkstoffe und Korrosion“ 34 (6), S. 295–299 (1983)

Bericht Nr. 92  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

# Zum Kontaktverhalten von feuerverzinktem und unverzinktem Bewehrungsstahl in Beton bei erhöhter Temperatur

Contact behaviour of galvanized and ungalvanized steel in concrete at higher temperature

J. Rückert und F. Neubauer\*

Elektrochemische Messungen an unverzinktem und feuerverzinktem Bewehrungsstahl in chloridfreiem und chloridhaltigem Mörtel bei 60 °C zeigen, daß eine Potentialumkehr zwischen Stahl und Zink im Zeitraum von 30 Wochen nicht stattfindet. Der Kontaktstrom zwischen Stahl und Zink ist immer anodisch auf Zink bezogen. Er geht stetig im Verlauf der Zeit zurück, liegt jedoch in chloridhaltigem Mörtel etwas höher als in chloridfreiem. Der Kontakt zwischen Stahl und Zink führt deshalb zumindest in der Anfangsphase zu erhöhtem Zinkabtrag. Ohne Kontakt mit Stahl weist Zink sowohl in chloridfreiem als auch in chloridhaltigem Mörtel nur geringen Korrosionsangriff auf.

Electrochemical measurements at 60 °C on steel and galvanized steel embedded in cement mortar with and without chloride show that there is no potential reversion between steel and zinc during the test time of 30 weeks. The contact current between steel and zinc is always anodical related to zinc. The current is continually diminishing with time, its value is slightly higher in mortar containing chloride. Contacted steel and galvanized steel therefore leads to a higher zinc loss at least in the starting time. Without contact there is only a small corrosion attack on zinc in both cases of chloride free and chloride containing mortar.

## 1 Problemstellung

Im Zusammenhang mit dem Einsatz verzinkter Bewehrungsstähle im Stahlbetonbau ist die Frage nach einer „Potentialumkehr“ des Zinks bei erhöhter Temperatur aufgeworfen worden. Mit „Potentialumkehr“ ist eine anodische Verschiebung des freien Korrosionspotentials des Zinks über das des unlegierten Stahles hinaus gemeint, woraus sich bestimmte Konsequenzen für das Korrosionsverhalten des Stahles ergeben könnten. Der Begriff „Potentialumkehr“ stammt aus der Installationstechnik der Warmwasserversorgung und dient als Erklärung für das verschiedentliche Auftreten von Korrosionsschäden an verzinkten Stahlrohren bei Temperaturen über etwa 60 °C. Diese Schäden werden in Verbindung gebracht mit einer Potentialveredelung des Zinks, die an Störstellen der Verzinkungsschicht bzw. zufällig freiliegenden Stahloberflächen eine anodische Polarisierung mit erhöhter Abtragsgeschwindigkeit des Stahls zur Folge hat. Die Übertragung dieser Verhältnisse auf Stahl in Beton ist aufgrund völlig anders gearteter Umgebungsbedingungen zunächst nicht plausibel. Anders als im annähernd neutralen Medium Wasser liegt unverzinkter Stahl im alkalischen Beton im Passivzustand vor. Eine begrenzte anodische Polarisierung durch eine eventuelle Potentialveredelung des Zinks würde in einem solchen Fall nicht zum Auftreten von Korrosionserscheinungen führen. Sind im Beton jedoch passivitätsstörende Bestandteile vorhanden – in der Praxis ist insbesondere mit Chloriden zu

rechnen – können sich Komplikationen im Korrosionsverhalten unverzinkten Stahles ergeben. Hier wäre durch eine anodische Polarisierung, verbunden mit dem Erreichen des chloridmengenabhängigen Lochkorrosionspotentials, die Auslösung oder Verstärkung örtlicher Korrosionserscheinungen denkbar.

In den durchgeführten Versuchen sind sowohl chloridfreier als auch chloridhaltiger Beton berücksichtigt worden.

## 2 Versuchsanordnung und Meßprogramm

Zur Untersuchung des elektrochemischen Verhaltens von verzinktem und unverzinktem Stahl wurden Zementmörtelzylinder mit einem Durchmesser von  $d = 70$  mm und einer Höhe von  $h = 140$  mm hergestellt. Der Mörtel hatte die Zusammensetzung

1350 g Normsand (DIN 1164)  
450 g PZ 45 F – HS  
225 ml Wasser.

Zur Bestimmung des Chlорideinflusses wurde einem Teil des Mörtels 2% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht in Form von Calciumchlorid beigemischt. Alle Mörtelzylinder enthielten einen vollständig feuerverzinkten und einen unverzinkten Betonrippenstahlabschnitt ( $d = 8$  mm) in einer Anordnung, die eine allseitige Mörtelüberdeckung von mindestens 2 cm gewährleistete (Abb. 1). Getrennt nach chloridhaltigem und chloridfreiem Mörtel wurden in zwei Versuchsfäßen je 6 der Probekörper in gesättigter Calciumhydroxidlösung von 60 °C unter Atmosphärenzutritt ausgelagert. Bei 3 der Probekörper waren die beiden Stahlabschnitte über

\* Dr.-Ing. Joachim Rückert und Dipl.-Ing. Franz Neubauer, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Fachgruppe 1.3: Korrosion und Metallschutz, Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45.

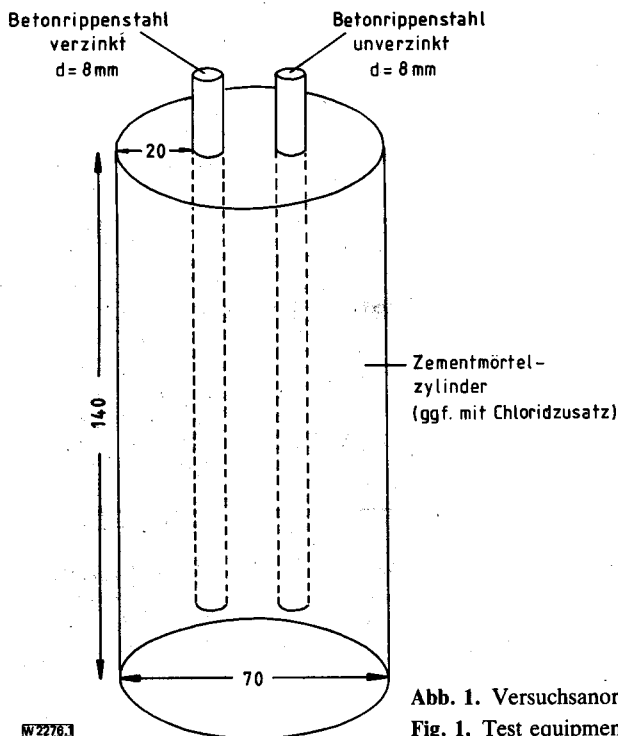


Abb. 1. Versuchsanordnung  
Fig. 1. Test equipment

äußere Meßwiderstände von  $0,1 \Omega$  ständig kurzgeschlossen; sie dienten der Messung der Stromabgabe des Elementes verzinkter Stahl/unverzinkter Stahl. Wegen der willkürlich gewählten Versuchsgeometrie, der nicht homogenen Stromdichteverteilung und des Flächenverhältnisses 1:1 haben die Absolutwerte der rechnerischen Stromdichten nur eine untergeordnete Bedeutung für die Praxis. Wesentlicher dagegen sind die Stromrichtung und der zeitliche Verlauf der Stromdichten.

An den 3 restlichen Probekörpern wurde ohne metallischen Kontakt miteinander die zeitliche Veränderung der freien Korrosionspotentiale von verzinktem und unverzinktem Stahl gemessen. Die Versuchsdauer erstreckte sich über insgesamt 30 Wochen. Um einen Eindruck von dem Erhaltungszustand der Verzinkungsschicht zu gewinnen, wurden nach Beendigung der Versuche metallographische Schliffe der verzinkten Stahlproben angefertigt und weiterhin augenscheinliche Überprüfungen der unverzinkten Stahlabschnitte vorgenommen.

Alle im folgenden angegebenen Potentialwerte wurden mit einer gesättigten Kalomelelektrode gemessen und auf die Normalwasserstoffelektrode umgerechnet.

### 3 Ergebnisse chloridfreier Mörtel

#### 3.1 Potentialverlauf (kontaktlos)

Als Vergleich zeigt Abb. 2 die unterschiedlichen Verläufe der freien Korrosionspotentiale von verzinktem und unverzinktem Stahl ohne gegenseitige Beeinflussung. Ausgehend von stärker streuenden Potentialwerten zwischen  $-600$  und  $-900$  mV findet beim verzinkten Stahl im Verlauf der 30 Wochen eine stetige Potentialerhöhung bis in die Größenordnung von  $-200$  bis  $-300$  mV statt. Dieser Vorgang läßt sich dadurch erklären, daß nach einer anfänglich stärkeren aktiven Korrosion Passivierungseffekte durch Deckschichtbildung mit einer Erniedrigung der anodischen Teilstromdichte der Zinkauflösung auftreten. Ein vergleichbares Verhalten von Zink in

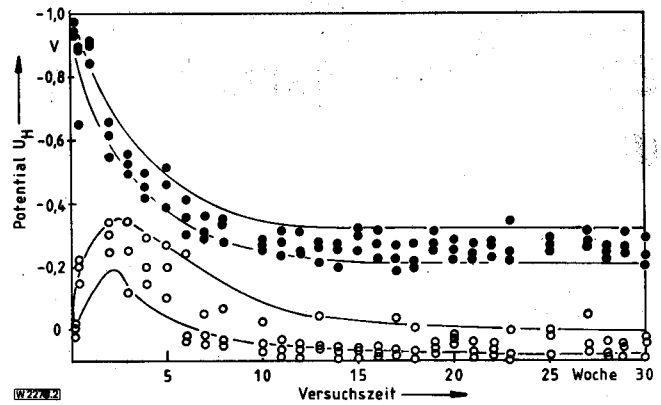


Abb. 2. Zeitlicher Verlauf der freien Korrosionspotentiale von verzinktem (●) und unverzinktem (○) Stahl in chloridfreiem Mörtel

Fig. 2. Free corrosion potentials of galvanized (●) and ungalvanized (○) steel in chloride free mortar as a function of time

alkalischen Medien ist bei Raumtemperatur von *Kaesche* [1] beobachtet worden.

Der Potentialverlauf von unverzinktem Stahl entspricht aufgrund der spontanen Passivierung des Stahles den Erwartungen. Sieht man von einer vorübergehenden Erniedrigung ab, liegen die Potentialwerte bei 0 bis 100 mV.

Grundsätzlich gilt, daß eine Potentialdifferenz im Sinne einer Potentialumkehr des Zinks gegenüber Stahl nicht gegeben ist.

#### 3.2 Elementstromverlauf

In Übereinstimmung mit den Potentialverhältnissen gestaltet sich der Stromverlauf bei Kontaktproben derart, daß zu jedem Zeitpunkt ein auf Zink bezogen anodischer Elementstrom fließt. Dieser beginnt unter den speziellen elektrodengeometrischen Voraussetzungen bei etwa  $6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  und geht zum Ende der Versuchszeit im Rahmen der Meßgenauigkeit gegen 0 (Abb. 3). Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Strommeßanordnung eine Auflösung von etwa  $\pm 0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  zuließ. Auch diese Messungen erlauben die Folgerung, daß nach stärkerer Korrosion im Aktivzustand des Zinks Deckschichten entstehen, die eine zunehmende Hemmung der anodischen Auflösungsvorgänge bewirken. Diese Deckschichtbildung bzw. Passivierung des Zinks ist als längerfristiger Vorgang anzusehen, der in seinem zeitlichen Fortgang zu einer geringeren Aktivität des Elementes Zink/Stahl führt. Analogien hierzu lassen sich aus Untersuchungen von *Martin* und *Rauen* [2, 3] ableiten, die festgestellt haben, daß der größte Zinkabtrag in den ersten Wochen des Kontaktes mit Beton stattfindet, und daß danach ein allmählicher Rückgang erfolgt.

#### 3.3 Metallographische Untersuchungen

Anhand des Potentialverhaltens von Zink und Stahl und des Elementstromverlaufes konnte für die aktive Anfangsphase der Zinkkorrosion mit einer merkbaren Beeinflussung durch Kontakt mit passivem Stahl gerechnet werden. Einen Eindruck davon geben Schliffe der Zinkschichten. Abb. 4 zeigt den Ausgangszustand eines verzinkten Betonstahles, während in der Abb. 5 die Zinkschicht nach 30wöchiger Auslagerung ohne Kontakt mit unverzinktem Stahl dargestellt ist. Ein mit

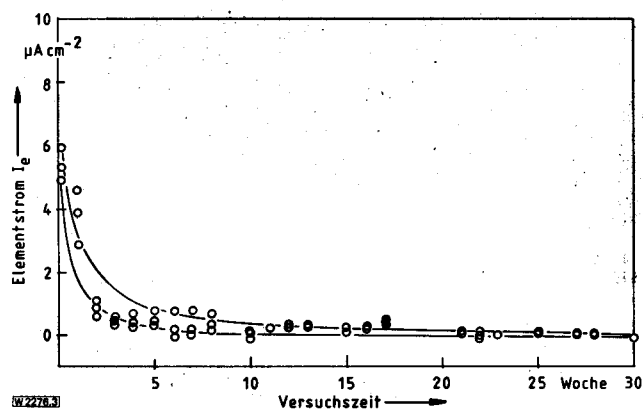
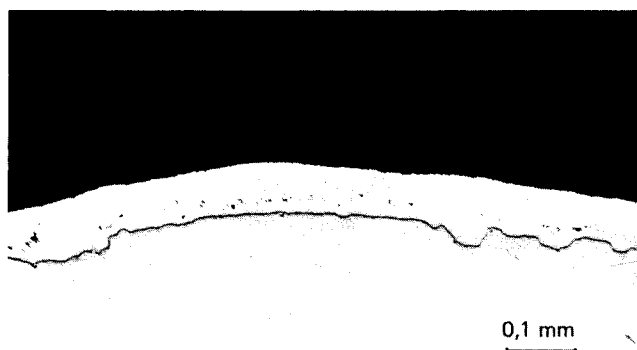


Abb. 3. Zeitlicher Verlauf des Elementstromes verzinkter/unverzinkter Stahl (Ordinate anodisch auf Zink bezogen) in chloridfreiem Mörtel

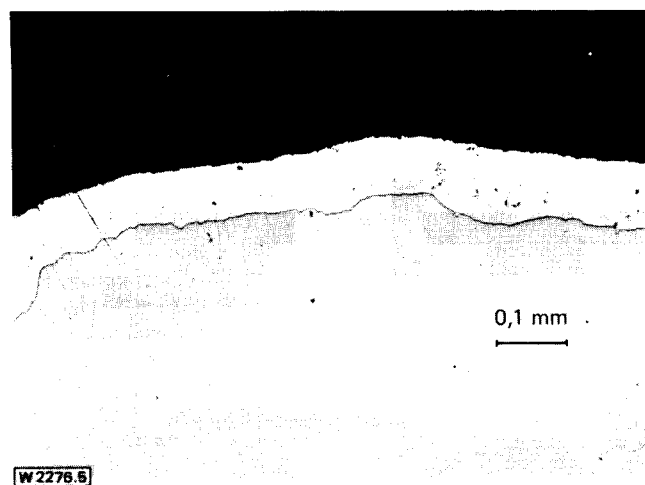
Fig. 3. Current of the galvanic couple galvanized/ungalvanized steel in chloride free mortar as a function of time (current anodical related to zinc)



W 2276.4

Abb. 4. Verzinkungsschicht eines Betonrippenstahles im Ausgangszustand

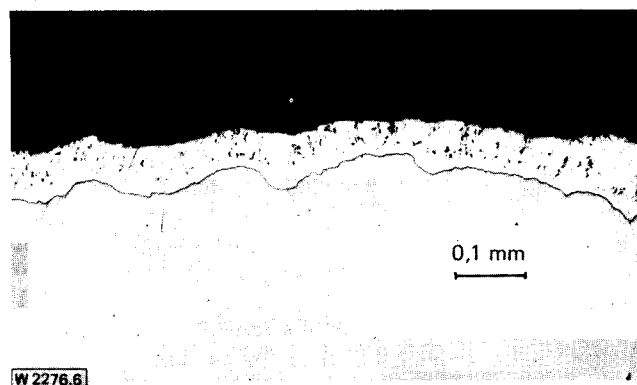
Fig. 4. Basic state of zinc layer



W 2276.5

Abb. 5. Verzinkungsschicht nach 30wöchiger Auslagerung in chloridfreiem Mörtel ohne Kontakt zu unverzinktem Stahl

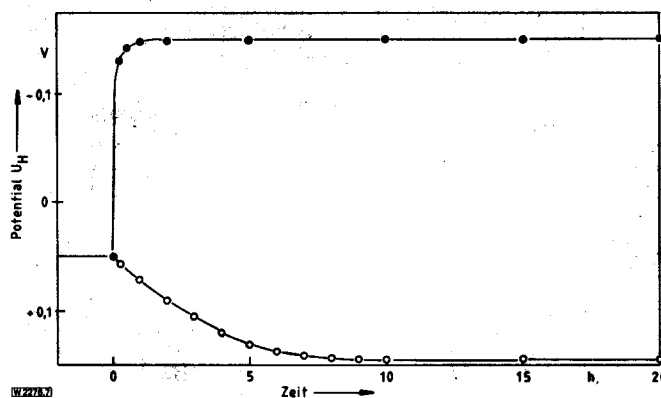
Fig. 5. Zinc layer after 30 weeks exposure in chloride free mortar without contact to ungalvanized steel



W 2276.6

Abb. 6. Verzinkungsschicht nach 30wöchiger Auslagerung in chloridfreiem Mörtel mit Kontakt zu unverzinktem Stahl

Fig. 6. Zinc layer after 30 weeks exposure in chloride free mortar with contact to ungalvanized steel



W 2276.7

Abb. 7. Zeitlicher Potentialverlauf von verzinktem (●) und unverzinktem (○) Stahl nach Lösen des Kontaktes (30 Wochen Gesamtversuchsdauer, chloridfreier Mörtel)

Fig. 7. Potential/time function of galvanized (●) and ungalvanized (○) steel after disconnecting contact (total test duration 30 weeks, chloride free mortar)

hinreichender Genauigkeit quantifizierbarer Unterschied ist nicht feststellbar; es ist lediglich eine geringe Aufrauung der beanspruchten Zinkoberfläche durch Korrosion zu beobachten. Wesentlich andere Merkmale weisen dagegen verzinkte Proben auf, die während der Versuchszeit in ständigem metallischem Kontakt mit unverzinktem Stahl standen (Abb. 6). Hier ist ein ausgeprägter Zinkabtrag infolge Elementbildung erfolgt. Inwieweit es sich hierbei aber tatsächlich nur um Anfangsvorgänge gehandelt hat, die später zum Stillstand kommen, läßt sich aus diesem, einer Momentaufnahme entsprechenden Ergebnis, nicht ableiten.

### 3.4 Mischpotentiale (Kontakt)

Bei ständigem Kontakt zwischen verzinktem und unverzinktem Stahl stellen sich Mischpotentiale ein, die im wesentlichen durch das freie Korrosionspotential des unlegierten Stahles bestimmt sind. Öffnen des Kontaktes bewirkt einen sofortigen steilen Potentialabfall des Zinks, während beim Stahl nur ein naturgemäß geringerer, allmählicher Potentialanstieg auf das zugehörige freie Korrosionspotential stattfindet. Daraus ist zu schließen, daß eine wesentlich stärkere Polarisierbarkeit des Zinks vorhanden ist (Abb. 7).

## 4 Ergebnisse chloridhaltiger Mörtel

### 4.1 Potentialverlauf (kontaktlos)

In chloridhaltigem Mörtel tritt bei beiden Werkstoffen ein grundsätzlich anderes Verhalten im freien Korrosionspotential als in chloridfreiem Mörtel auf; alle Potentialwerte liegen auf einem erheblich negativeren Niveau (Abb. 8). Verzinkter Stahl zeigt keine Potentialveredelung, die unvergleichbar mit der in chloridfreiem Mörtel wäre. Vielmehr werden über 30 Wochen nahezu gleichbleibende Potentiale von  $-600$  bis  $-800$  mV gemessen. Für unverzinkten Stahl ergibt sich eine ähnliche Konstanz der Meßwerte, die zwischen  $-250$  und  $-450$  mV liegen. Es kann davon ausgegangen werden, daß sich beide Werkstoffe auf einem von der Chloridionenkonzentration abhängigen Lochfraßpotential bzw. einem Potential aktiver Auflösung stabilisieren. Für Stahl gehört die Existenz eines echten Lochfraßpotentials zum elektrochemisch abgesicherten Grundtatbestand. An Zink ist von *Kaesche* [1] anhand von Stromdichte-Potentialkurven ein Potential gemessen worden, bei dem die Passivität zusammenbricht. Da allerdings die Zinkoberfläche gleichmäßig angegriffen wurde, ist von ihm hierfür der Begriff Durchbruchpotential verwendet worden. Die Potentialdifferenzen zwischen Zink und Stahl sind allgemein geringer als in chloridfreiem Mörtel, jedoch wird ebenfalls keine Potentialumkehr festgestellt.

### 4.2 Elementstromverlauf

Der Stromverlauf gestaltet sich erwartungsgemäß anhand der Potentialverhältnisse derart, daß auch hier grundsätzlich auf Zink bezogen anodische Ströme fließen. Bei kontinuierlichem zeitlichem Rückgang der Elementströme liegen diese allerdings merkbar über denen in chloridfreiem Mörtel (Abb. 9).

### 4.3 Metallographische Untersuchungen

In Übereinstimmung mit den Elementströmen zeigt sich an den verzinkten Kontaktproben ein deutlicher Korrosionsabtrag, der stärker ist als in chloridfreiem Mörtel (Abb. 10). Proben ohne elektrische Verbindung weisen dagegen einen

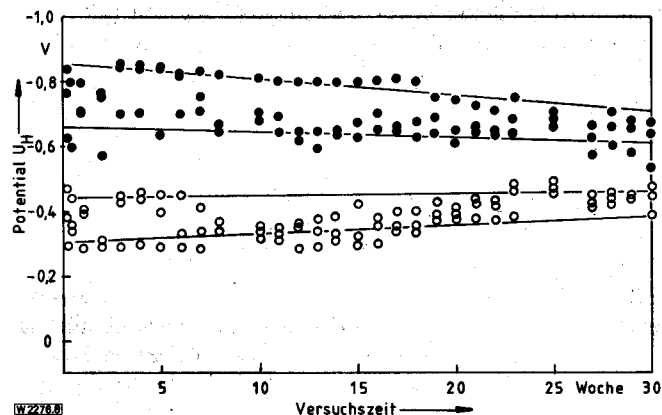


Abb. 8. Zeitlicher Verlauf der freien Korrosionspotentiale von verzinktem (●) und unverzinktem (○) Stahl in chloridhaltigem Mörtel  
Fig. 8. Free corrosion potentials of galvanized (●) and ungalvanized (○) steel in chloride containing mortar as function of time

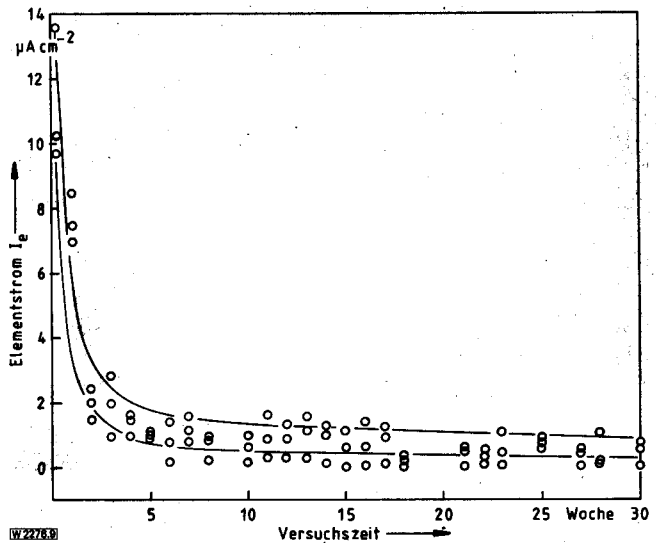


Abb. 9. Zeitlicher Verlauf des Elementstromes verzinkter/unverzinkter Stahl (Ordinate anodisch auf Zink bezogen) in chloridhaltigem Mörtel

Fig. 9. Current of the galvanic couple galvanized/ungalvanized steel in chloride containing mortar as a function of time (current anodical related to zinc)

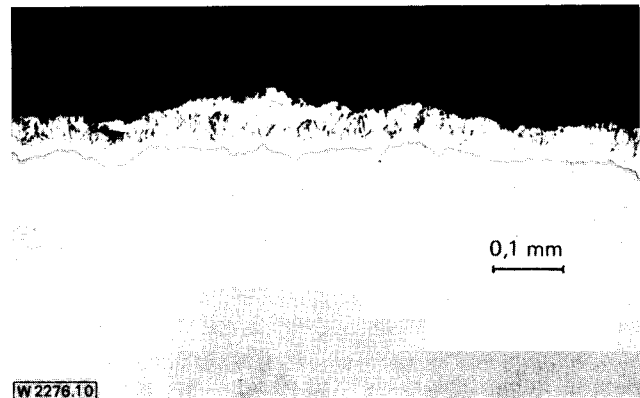


Abb. 10. Verzinkungsschicht nach 30wöchiger Auslagerung in chloridhaltigem Mörtel mit Kontakt zu unverzinktem Stahl

Fig. 10. Zinc layer after 30 weeks exposure in chloride containing mortar with contact to ungalvanized steel

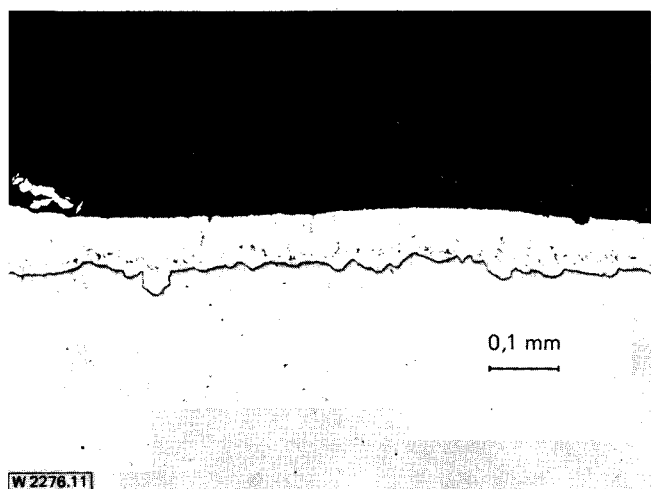
wesentlich geringer ausgeprägten Korrosionsangriff auf (Abb. 11).

### 4.4 Mischpotential

Das Mischpotential der in Kontakt befindlichen Werkstoffe liegt in etwa symmetrisch zu den beiden Einzelpotentialen. Trennung des Kontaktes führt zu einer verzögerten Einstellung der Stationärwerte, die im Sinne von Lochkorrosions- bzw. Durchbruchpotentials gedeutet wurden (Abb. 12).

## 5 Lochkorrosion

Der im alkalischen Medium im Passivzustand vorliegenden unverzinkte Bewehrungsstahl erleidet durch Chloridionen



W 2276.11

Abb. 11. Verzinkungsschicht nach 30wöchiger Auslagerung in chloridhaltigem Mörtel ohne Kontakt zu unverzinktem Stahl

Fig. 11. Zinc layer after 30 weeks exposure in chloride containing mortar without contact to ungalvanized steel

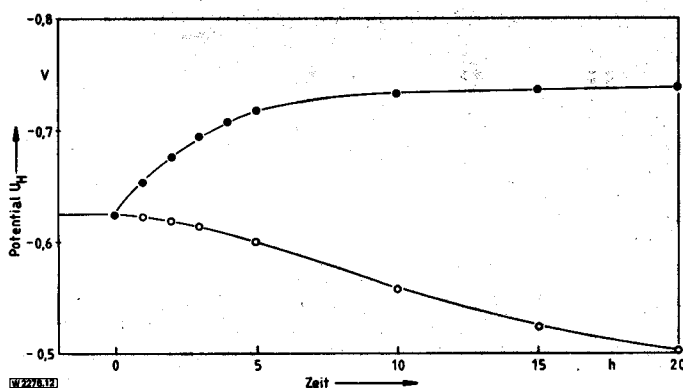


Abb. 12. Zeitlicher Potentialverlauf von verzinktem (●) und unverzinktem (○) Stahl nach Lösen des Kontaktes (30 Wochen Gesamtversuchsdauer, chloridhaltiger Mörtel)

Fig. 12. Potential/time function of galvanized (●) and ungalvanized (○) steel after disconnecting contact (total test duration 30 weeks, chloride containing mortar)

Lochkorrosion. Das zugehörige Lochkorrosionspotential wird im wesentlichen durch die Chloridkonzentration bestimmt. Gelingt es, mit Hilfe kathodischer Polarisation das Lochfraßpotential zu unterschreiten, ist eine Verhinderung der Lochkorrosion gegeben.

Vor diesem Hintergrund sind die Mischpotentiale bei Kontakt von verzinktem und unverzinktem Stahl in chloridhaltigem Mörtel betrachtet worden. Es war vorstellbar, daß die Wirkung des Zinks ausreicht, den unverzinkten Stahl aus dem Lochfraßbereich hinaus kathodisch zu polarisieren. Augen-

scheinliche Untersuchungen nach Ende der Versuche an unverzinkten Stählen, die mit und ohne Kontakt mit verzinkten Stählen standen, brachten signifikante Unterschiede in der Stärke des Korrosionsangriffs. Zwar waren auch bei Kontakt mit verzinktem Stahl örtliche Korrosionserscheinungen sichtbar, die jedoch in Zahl und Ausmaß deutlich niedriger waren als im Fall der frei in chloridhaltigem Mörtel korrodierten Stähle. Dieser Sachverhalt läßt den Schluß zu, daß ein kathodischer Schutz von freiliegenden Stahloberflächen durch eine Verzinkung bei Einwirkung chloridhaltiger Umgebungsbedingungen möglich ist. In der Praxis wird die Wirksamkeit weitgehend von den Flächenverhältnissen, den geometrischen Besonderheiten und der Leitfähigkeit der Betonmatrix abhängen, die nicht identisch mit denen der für die Untersuchung verwendeten Bedingungen sind. Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, daß der kathodische Schutz zwangsläufig zu einem erhöhten Zinkabtrag führt. Intensität und Dauer der Schutzwirkung können nicht ohne weiteres abgeschätzt werden. Es ist jedoch die Aussage zulässig, daß durch eine Verzinkung eine Verminderung des Korrosionsrisikos für schlaaffe Bewehrungsstähle in chloridhaltigem Beton erreicht werden kann.

## 6 Zusammenfassung

Weder in chloridfreien noch in chloridhaltigen Mörtelproben zeigt nach einer Auslagerungsdauer von 30 Wochen bei 60 °C verzinkter Bewehrungsstahl Änderungen des freien Korrosionspotentials, die zu einer Veredelung gegenüber unverzinktem Stahl führen. Ohne Kontakt mit unverzinktem Stahl weisen die Verzinkungsschichten nur geringfügigen Korrosionsangriff auf, der auch im Falle des Chlorids keinen örtlichen Charakter hat.

Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit Ergebnissen anderer Autoren [1–3], so daß auch bei den erhöhten Temperaturen kein grundsätzlich anderes Korrosionsverhalten des Zinks vorliegen dürfte.

Elementbildung mit unverzinktem Stahl dagegen bewirkt erhöhten Zinkabtrag, der in chloridhaltigem Mörtel stärker ausgeprägt erscheint. Dieses Verhalten ist bei passivem Stahl ohne Vorteil; es kann sich jedoch bei gestörter Passivität als kathodischer Schutz für unverzinkten Stahl erweisen.

## 7 Schrifttum

1. H. Kaesche: Werkst. Korros. 20 (1969) 119–124.
2. H. Martin, A. Rauen: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 242, S. 61–77, Berlin 1974.
3. H. Martin, A. Rauen: AIF-Forschungsvorhaben Nr. 1684, Abschlußbericht vom 28. 6. 1973.

(Eingegangen: 10. 1. 1983)

W 2276